以跨学科大纵深研究策源重大原始创新：新一代集成电路光刻系统突破的启示

余 江[1,2*] 刘佳丽[1,2] 甘 泉[3] 李世光[4] 张 越[1,2]

1 中国科学院科技战略咨询研究院 北京 100190
2 中国科学院大学 公共政策与管理学院 北京 100049
3 中国科学院 发展规划局 北京 100864
4 中国科学院微电子研究所 北京 100029

摘要 重大原始创新需要依托跨学科、大纵深的开创性研究拓展人类知识边界。作为国家战略科技力量的国立科研机构，在加快打造原始创新策源地、加快突破关键核心技术、努力抢占科技制高点方面，肩负重大责任和使命。文章以20世纪90年代末美国能源部国家实验室实施的新一代集成电路光刻系统重大原始创新项目为案例，通过对该项目实施过程中前瞻的战略定位、明确的顶层设计，以及高效的攻关与协同组织模式等方面的深度剖析，为进一步高效发挥国家战略科技力量，聚焦以重大需求目标为牵引的核心科学问题，建设跨学科大纵深的顶尖研究高地，形成多元主体协同创新的高效组织提供重要启示；并为我国在战略前沿推动集科学新发现、技术新轨道和产业新方向于一体的重大突破，真正打造原始创新策源地提供参考。

关键词 重大原始创新，国家战略科技力量，新一代光刻技术，创新策源地

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20191211001

国立科研机构体现国家意志，代表国家水平，肩负发挥国家战略科技力量的责任和使命。作为一国面向国际科技竞争的战略平台，国立科研机构是保障国家安全、推动高质量发展的重要支撑，也是突破型、引领型、平台型一体化的大型综合性研究基地[1,2]。

2019年11月，习近平总书记在致中国科学院建

*通讯作者

资助项目：国家自然科学基金重点项目（71834006），国家自然科学基金应急项目（71941031），国家自然科学基金青年项目（71704173），中国科协创新战略研究院科研项目（2019ys1-1-2-2），中国科学院战略研究与决策支持系统建设专项（GHJ-ZLZX-2019-32-6）

修改稿收到日期：2019年12月22日

院70周年的贺信中，“希望中国科学院不忘初心、牢记使命，抢抓战略机遇，勇立改革潮头，勇攀科技高峰，加快打造原始创新策源地，加快突破关键核心技术，努力抢占科技制高点，为把我国建设成为世界科技强国作出新的更大的贡献”。这是党中央对中国科学院未来发展的殷切期望，也为强化国家战略科技力量以及国立科研机构的创新发展指明了前进方向、提供了根本遵循。

重大原始创新是具有重大影响力的根本性、彻底性的创新，科学上的原始创新通常包括基础研究领域的重大突破和高技术领域内的根本性创新等[3,4]，通常需要依托跨学科、大纵深、开创性的研究，实现科学技术前沿的重大突破，拓展人类知识边界。我国正在实施创新驱动发展战略，迫切要求国立科研机构作为重要的国家战略科技力量，在开展科研活动时更加突出前瞻性、战略性、颠覆性，立足于国家重大战略需求，聚焦“从0到1”的原始创新，真正突破和掌握那些“卡脖子”位置的关键核心技术[5]。

如何策源重大原始创新，引领并主导未来全球科技竞争的源头技术，其内在许多规律性、制度性的问题亟待探索研究。美国能源部（DOE）下属的10多个国家实验室作为美国的国家战略科技力量，拥有“航母”级别的跨学科研发平台，一直重视高创新度和战略性研究，汇聚了全球顶尖人才资源[6]。20世纪90年代末，3个DOE所属国家实验室——劳伦斯·利弗莫尔国家实验室（LLNL）、劳伦斯·伯克利国家实验室（LBNL）和桑迪亚国家实验室（SNL），在产业合作伙伴的紧密支持下，通过多学科交叉融合研究和协同创新合作，在集成电路领域联合突破了极远紫外（EUV）光刻技术系统相关的诸多核心科学和技术难题，阐释了许多全新机制和新机理，为全球集成电路产业进入新一代光刻技术时代作出了决定性贡献。

系统归纳和总结发达国家国立科研机构在重大原始创新中的战略定位、顶层设计以及攻关机制与组织模式等方面的历程及经验，可以为中国科学院作为国家战略科技力量打造重大原始创新策源地提供重要启示和借鉴。

1 美国国家实验室突破新一代光刻系统的核心科学和技术难题

1.1 集成电路产业面临技术革命十字路口

集成电路作为全球高技术产业的核心，在支撑经济社会发展和保障国家安全中发挥着战略性、基础性和先导性作用。一直以来，作为集成电路制造工艺最核心的技术，光刻技术的创新发展直接决定“摩尔定律”能否继续有效演进，也反映和推动了人类科技前沿的进步。

20世纪90年代中后期，全球集成电路工艺面临深刻变革，一直占据主流地位的、基于传统光学的集成电路光刻技术受到挑战。集成电路产业界认识到，为了在芯片上制造更小尺寸的图形，基于全新光源的新一代光刻技术（NGL）亟待开发。而有望突破芯片技术极限的新技术包括F2激光、离子投射（IPL）、电子束（投射EPL）、极远紫外（EUV）等多项备选光刻技术路线。由于新一代光刻技术作为全新的芯片前沿工艺体系，其研发是一个庞大的原始创新工程，需要光学、数学、物理学、微电子学、材料学与精密机械以及控制等多学科交叉的深度融合研究；科学家必须在光源、结构、器件、工艺及检测等领域解决一系列核心科学问题，并阐释许多新机制和新机理。而当时的芯片企业并不具备跨学科大研发平台，难以找到可行的技术节点向下延伸的途径[7]。面临技术路线的不确定性与巨大的科学挑战，集成电路产业界陷入迷茫之中，萌生了向科研实力雄厚的国家实验室寻求帮助的强烈意愿。

1.2 新一代光刻研发与国家实验室

20世纪90年代初，美国联邦政府加大了对国家实验室开展重大技术领域前沿挑战为导向的LDRD项目

（实验室主导的研究和开发项目）的支持力度，吸引了一批优秀中青年科学家和博士后群体在国家实验室大平台上从事跨学科研究。1994 年，DOE 资助了第一个 EUV 光刻技术研发项目，该项目由 DOE 所属国家实验室、贝尔实验室和个别企业开展研究。然而，早期的原理验证探索受限于有限的经费支持和较低的产业界参与力度，项目整体上研究松散并进展缓慢。

1995 年，由于美国联邦政府对国家实验室研发预算的消减，DOE 下属的 3 个国家实验室正在进行的 EUV 研究面临半途而废的危险。他们认识到，必须基于对重大平台设施的战略性投资和研究积累，面向未来产业应用场景，与产业界联合开展新一代集成电路核心技术攻关，尤其要突破内在原理探索性研究，才能建立产业界对集成电路未来核心工艺技术发展的信心。

同时，全球集成电路产业龙头也在积极寻找芯片核心工艺技术节点向下延伸的途径[7,8]，并希望EUV光刻技术能够解决该瓶颈。1997 年，美国的英特尔公司联合摩托罗拉公司、AMD（超微半导体公司）、美光公司、IBM（国际商业机器公司）和德国英飞凌公司组成 EUVLLC（EUV Limited Liability Corp.）联盟，美国 SVGL（硅谷光刻集团）和荷兰 ASML（阿斯麦尔公司）等光刻机厂商后续也加入了这个联盟，并以此为依托和渠道与这 3 个 DOE 所属的国家实验室开展深度合作。

1.3 “虚拟国家实验室”：协同组织创新模式

考虑到各个国家实验室在科研方向和研发积累上各有专长，这 3 个国家实验室设计了“虚拟国家实验室”（VNL）组织模式，组织协同攻关，并与产业联盟伙伴合作。“虚拟国家实验室”与 EUVLLC 联盟签订了联合研发协议（CRADA），并由 EUVLLC 联盟在最初 3 年为“虚拟国家实验室”合作项目的光刻基础研发提供 2.5 亿美元预算（含人员和设备费用）[9]。该项目成为当时美国国家实验室参与的最大联合研究项目之一，也间接解决了国家实验室当时所面临的整体经费预算缩减的问题。

“虚拟国家实验室”合作项目的领导层包括首席执行官（CEO）和首席运营官（COO），他们分别来自这 3 个 DOE 所属国家实验室。此外，“虚拟国家实验室”合作项目以来自这 3 个国家实验室的 100 多名世界顶尖科学家为骨干，面向 EUV 光刻技术系统研发的若干重大科学问题，组成了多个研发团队，形成国家实验室内部和多个国家实验室之间的前沿交叉融合研究的态势。

在分工协同方面，“虚拟国家实验室”项目综合考虑各国家实验室的专长和突出优势，进行了定位明确的研发任务分工部署：由研发体量最大的桑迪亚实验室，负责新光源系统研发、记录材料研究以及对整个 EUV 工程原型系统的整合开发任务；劳伦斯 · 伯克利国家实验室负责精确光学测量、多层镀膜检测系统等研发任务；劳伦斯 · 利弗莫尔国家实验室负责关键的新光学器件设计以及掩模版系统研发等。而 EVULLC 联盟的企业则通过提供相关研发预算、分享产业研发前景与应用经验，与“虚拟国家实验室”项目共同形成整体研究框架与年度研发行动计划。

1.4 新一代光刻技术原始创新的突破实现

1997—2003 年，“虚拟国家实验室”合作项目团队面向未来集成电路光刻技术产业化的愿景，紧密系统协作，通过多学科交叉融合研究，高强度地开展了一系列新理论验证和基础技术探索，突破了EUV系统在光学、器件、加工和检测等领域的基础科技难题，取得了一系列前沿成果，申请了 60 多个高价值核心专利，并从系统机理上全面验证了 EUV 技术体系商用的先进性与可行性。

在此过程中，以英特尔、IBM、ASML 等为代表的产业合作伙伴通过“虚拟国家实验室”项目合作计划，分享了这 3 个 DOE 所属国家实验室的系列突破性科研成果和高价值平台资源，从而极大地推动了新

一代光刻系统技术的研发进程。2002 年 3 月，桑迪亚国家实验室宣布，“虚拟国家实验室”项目联合研制的 EUV 工程测试样机在全球首次完成技术可行性的测试和验证[10]。这成为集成电路光刻技术发展史上一个划时代的里程碑，确立了 EUV 技术作为新一代集成电路核心工艺技术的全球主流技术地位，也坚定了集成电路产业界对该技术未来成功规模化商用的共识与信心。

在达到预定的研发战略目标后，围绕 EUV 系统研发的“虚拟国家实验室”项目于 2003 年前后基本告一段落，这 3 个 DOE 所属国家实验室仅保持了少数精干团队继续跟踪相关前沿动态。而英特尔和 ASML 等产业伙伴则以空前的热情和积极性来转化和运用该研发项目取得的重要科学发现成果，继续推动新一代光刻技术面向规模量产的商用化开发进程。ASML 于 2006 年 8 月推出了全新的 EUV 光刻商用测试机，这标志着 EUV 光刻技术研发成果的商用开发进入“快车道”。2015 年，面向规模量产的 EUV 光刻机系统终于研发成功，其后很快被国际集成电路领军企业（如台积电、三星等）应用于最前沿的芯片制造生产线，并于 2019 年向全球市场提供 7 nm 线宽的智能手机处理器和人工智能图形处理器等新一代高性能芯片，由此集成电路核心工艺技术进入了新一代 EUV 技术时代。

回顾上述新一代光刻技术研发过程中的历史性重大创新突破，这 3 个 DOE 所属国家实验室在其中发挥了关键的引领作用，从松散式的科学原理探索研究，转化为面向未来产业愿景、产学研用多方协同攻关的突破创新态势，形成了集科学新发现、技术新轨道和产业新方向于一体的“大纵深”整合突破，从而实现了“从 0 到 1”的重大原始创新。

2 思考及建议

策源重大原始创新，必须依托跨学科、大纵深、开创性的研发。我国近年来在前沿基础研究取得了长足发展，但在关键核心领域具有国际影响力的重大原创成果偏少，源头创新供给仍明显不足。在重大创新攻关中，各类创新主体间仍然存在各类有形无形的“围墙”和“栅栏”，跨学科跨领域的大协作尤其薄弱，经常出现彼此分割、缺乏深度信任的“小作坊”各自为战状态。创新攻关体系的效力和活力不足，较难有效地组织和策源重大原始创新活动，同时在重大领域具有宽广学科视野的领军人才仍然缺乏。如何聚焦核心科学问题，提升源头创新供给，打造跨学科、大纵深人才高地，形成多元主体协同创新的高效组织，成为策源“从 0 到 1”的重大原始创新的关键。

*（1）以重大战略需求目标为牵引，聚焦于核心科学问题研究和技术研发。*重大原始创新需要在战略前沿推动科学新发现、技术新轨道和产业新方向的集成突破。策源重大原始创新，需要以重大需求的目标为牵引，通过科学系统的降维分解，识别其所涉及的一系列核心科学技术难题，阐释亟待突破的新机制和新机理，为重大创新突破提供新概念和新方向。同时，应依托从事战略性研究、创新能力强的国家战略科技力量，前瞻聚焦核心科学问题和研发风险大的关键共性技术难题，努力探求未知世界，推动科学新思想、新思维的碰撞，勇于阐释新机制和掌握新机理，才能引领未来全球竞争中的关键核心技术与战略性产品的创新突破。

*（2）打造跨学科大纵深的顶尖研究人才高地。*策源重大原始创新，需要有效组织大尺度、跨领域、融合型的研究团队进行联合攻关。在新一代光刻技术研发中发挥突出作用的 3 个 DOE 所属国家实验室，聚集了精密机械、数学、物理学、光学、材料学、计量学和机电控制等多学科全球领军人才以及大批优秀青年科学家。例如，仅劳伦斯 · 伯克利国家实验室就拥有物理学、化学等领域的 12 名诺贝尔奖获得者。一方面，跨学科知识转移和知识整合对于重大创新具有重

要推动作用；另一方面，大纵深的战略研究平台对于突破性的知识生产具有显著拉动作用。策源重大原始创新，需要我们在更大范围、更广领域、更高层次上吸引全球高端科技人才，锻造一支充满活力的青年科技人才队伍。同时，必须有效发挥多领域融合的建制化优势，组织跨学科、大纵深、多团队的协同研发。

（3）建立多元主体协同创新的高效组织模式。借鉴新一代光刻技术攻关中的"虚拟国家实验室"项目组织模式创新，既要重视单个国家实验室组织内部以及不同国家实验室之间的协同创新，也要重视若干国家实验室与优势产业伙伴的协同合作，充分发挥产业伙伴在市场前景驱动下，高效实现前沿成果潜在价值的优势。在策源重大原始创新中，国家要进一步加强制度创新，推动"开放共享、深度协同"组织模式。以中国科学院为代表的国家战略科技力量，需要以雄厚前沿科研积累、高水平研发大平台和权责清晰的组织规则，形成强大的平台吸引力和合作凝聚力，激发产业合作伙伴的创新热情与潜能；在机制设计上，要保障多元创新主体高效协同创新，明确分工、明晰权责，落实成本和风险共担、知识和成果共享，支撑领域核心问题攻关与战略大系统集成研发，以大纵深宽视野的研发模式实现集科学重大发现、技术重大跃升和产业化重大方向于一体的突破。

总之，加快打造原始创新策源地，加快突破关键核心技术，努力抢占科技制高点，是中国科技界特别是国家战略科技力量义不容辞的光荣使命和重大责任。当前，面对百年未有之大变局，作为国家战略科技力量，中国科学院应主动面向世界科技前沿和国家重大需求，以大纵深、跨学科的大平台带动大协作，凝聚全球一流人才梯队，与业内创新领军企业形成深度协同，提升解决核心关键科学问题的能力和水平，从而在重大战略性领域不断提供高水平源头创新供给，打造原始创新策源地，为我国建设世界科技强国作出应有的重大贡献。

参考文献

1 白春礼. 国家科研机构是国家的战略科技力量. 光明日报, 2012-12-09(01).

2 陈凤, 余江, 甘泉, 等. 国立科研机构如何牵引核心技术攻坚体系：国际经验与启示. 中国科学院院刊, 2019, 34(8): 920-925.

3 白春礼. 原始性创新基础研究之魂. 中国基础科学, 1999, (1): 8-9.

4 邹承鲁, 陈述彭. 自然、人文、社科三大领域聚焦原始创新. 中国软科学, 2002, (8): 9-26.

5 余江, 陈凤, 张越, 等. 铸造强国重器：关键核心技术突破的规律探索与体系构建. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 339-343.

6 钟少颖, 聂晓伟. 美国联邦国家实验室研究. 北京: 科学出版社, 2017.

7 Linden G, Mowery D C, Ziedonis R H. National technology policy in global markets: Developing Next-Generation Lithography in the semiconductor industry. Business and Politics, 2000, 2(2): 93-113.

8 Garcia M L, Bray O H. Fundamentals of Technology Roadmapping. [1997-04-01]. http://www.acqnotes.com/Attachments/Fundamentals%20of%20Technology%20Roadmapping.pdf.

9 Lawrence Livermore National Laboratory. EUVL Partnership Makes Its Stand. [2001-04-06]. https://www.llnl.gov/news/euvl-partnership-makes-its-stand.

10 Bashor J. "Superchips" Partnership Teams Intel and Three National Labs. [1997-09-19]. https://www2.lbl.gov/Science-Articles/Archive/Intel-collab.html.

Major Original Innovation Based on Interdisciplinary Research: International Insights from Breakthrough of New Generation of Lithography System

YU Jiang[1,2*] LIU Jiali[1,2] GAN Quan[3] LI Shiguang[4] ZHANG Yue[1,2]

（1 Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2 School of Public Policy and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3 Bureau of Development Planning, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China;

4 Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China）

Abstract Major original innovation needs to rely on interdisciplinary and deep pioneering research to expand the boundaries of human knowledge. National Research Institutes, as an important national strategic scientific and technological force, bear responsibility and national mission in accelerating the creation of original innovation source, accelerating the breakthrough of key core technologies, and striving to seize the commanding heights of science and technology.In this study, through in-depth analysis of the forward-looking strategic positioning, clear top-level design, and efficient research mechanism and organization mode in the New Generation Lithography system breakthrough project, which was organized by the National Laboratory of the United States in the 1990s, we further provide insights for the national strategic scientific and technological force to efficiently promote the major original innovation in China, and to facilitate the major original innovation integration breakthrough of new scientific discovery, new technological trajectory and new industrial direction at the strategic frontier.

Keywords major original innovation, national strategic scientific and technological force, new generation lithography, source of innovation



余 江 中国科学院科技战略咨询研究院研究员，中国科学院大学公共政策与管理学院教授、博士生导师，中国科学院大学网络创新与发展研究中心执行主任，清华大学技术创新研究中心学术委员会委员，曾经担任剑桥大学英国皇家学会研究员。长期关注全球化背景下的高技术创新政策、数字化与竞争战略等研究，在“中欧高层创新对话”中担任中方专家组核心成员。在国内外核心期刊发表了一系列论文并出版英文专著。主持了国家自然科学基金重点项目、国家软科学计划重大项目等多项国家级重要科研课题。E-mail: yujiang@mail.casipm.ac.cn

YU Jiang Research Professor of Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences (CAS-ISD). He is also the Full Professor at School of Public Policy and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Director of Research Center of Network Innovation and Development, UCAS. Academic Committee Member of Research Center for Technological Innovation in Tsinghua University. Prof. Yu has worked as the Royal Society International Fellow in Cambridge University. His main research interest covers innovation policy, digitalization, and competition strategy. Prof. Yu has chaired important national funding programs such as Key Program of National Natural Science Foundation of China and National Soft-Science Key Projects. E-mail: yujiang@mail.casipm.ac.cn

■责任编辑：张帆

* Corresponding author

参考文献（双语版）

1 白春礼. 国家科研机构是国家的战略科技力量. 光明日报, 2012-12-09(01).

Bai C L. Scientific research institutions are the national strategic science and technology force. Guangming Daily, 2012-12-09(01). (in Chinese)

2 陈凤, 余江, 甘泉, 等. 国立科研机构如何牵引核心技术攻坚体系：国际经验与启示. 中国科学院院刊, 2019, 34(8): 920-925.

Chen F, Yu J, Gan Q, et al. How national research institutes pilot system for core technology breakthrough: International experience and implications. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(8): 920-925. (in Chinese)

3 白春礼. 原始性创新基础研究之魂. 中国基础科学, 1999, (1): 8-9.

Bai C L. Original innovation—The spirit of basic research. China Basic Science, 1999, (1): 8-9. (in Chinese)

4 邹承鲁, 陈述彭. 自然、人文、社科三大领域聚焦原始创新. 中国软科学, 2002, (8): 9-26.

Zou C L, Chen S P. Focusing on original innovation in natural, humanities and social sciences. China Soft Science, 2002, (8): 9-26. (in Chinese)

5 余江, 陈凤, 张越, 等. 铸造强国重器：关键核心技术突破的规律探索与体系构建. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 339-343.

Yu J, Chen F, Zhang Y, et al. Forging pillars of scientific and technological power: Mechanism exploration and system construction for breakthrough of core and key technologies. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(3): 339-343. (in Chinese)

6 钟少颖, 聂晓伟. 美国联邦国家实验室研究. 北京: 科学出版社, 2017.

Zhong S Y, Nie X W. Study on Federally Research and Development Centers. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese)

7 Linden G, Mowery D C, Ziedonis R H. National technology policy in global markets: Developing next-generation lithography in the semiconductor industry. Business and Politics, 2000, 2(2): 93-113.

8 Garcia M L, Bray O H. Fundamentals of Technology Roadmapping. [1997-04-01]. http://www.acqnotes.com/Attachments/Fundamentals%20of%20Technology%20Roadmapping.pdf.

9 Lawrence Livermore National Laboratory. EUVL Partnership Makes Its Stand. [2001-04-06]. https://www.llnl.gov/news/euvl-partnership-makes-its-stand.

10 Bashor J. “Superchips” Partnership Teams Intel and Three National Labs. [1997-09-19]. https://www2.lbl.gov/Science-Articles/Archive/Intel-collab.html.